

## 円筒座標系半陰的FDTD法を用いた金属円盤型表面波分割器の解析及び実験検討

著者	原 竜之
出版者	法政大学大学院理工学研究科
雑誌名	法政大学大学院紀要．理工学・工学研究科編
巻	60
ページ	1-3
発行年	2019-03-31
URL	<a href="http://doi.org/10.15002/00022028">http://doi.org/10.15002/00022028</a>

# 円筒座標系半陰的 FDTD 法を用いた 金属円盤型表面波分割器の解析及び実験検討

ANALYSIS OF A METAL DISC-TYPE SURFACE WAVE SPLITTER  
USING THE CYLINDRICAL SEMI-IMPLICIT FDTD METHOD AND ITS EXPERIMENTAL STUDY

原 竜之

Tatsuyuki HARA

指導教員 柴山 純

法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻修士課程

A metal disc-type surface wave splitter utilizing the propagation characteristics of spoof surface plasmon polaritons is analyzed using the cylindrical semi-implicit finite-difference time-domain (FDTD) method. We design the metal disc-type splitter with a center hole and radially placed gratings in the microwave region. Numerical and experimental results are in good agreement with each other. It is also shown that the computation time of the semi-implicit FDTD method is significantly reduced to less than 20% of the explicit counterpart, while maintaining the accuracy.

**Key Words :** *Cylindrical coordinates, Finite-difference time-domain (FDTD) method, Semi-implicit FDTD method, Spoof surface plasmon polariton, Surface wave splitter*

## 1. まえがき

円柱状デバイスを解析するために、円筒座標系における有限差分時間領域 (FDTD) 法が広く用いられている [1]. FDTD 法は陽解法であるため、Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) 条件により時間刻み幅の選択に制限を受ける。特に円筒座標系では、中心軸に近づくにつれ周回方向の空間刻み幅が極端に小さくなる。結果として時間刻み幅が小さくなり、長時間の計算が必要になる。そこで、CFL 条件による制限を最も強く受ける周回方向に陰解法を適用した、円筒座標系半陰的 FDTD 法が検討されている [2], [3].

ところで、マイクロ波からテラヘルツ波帯では金属にグレーティング構造を設けることで擬似的な表面プラズモンポラリトンを導波できることが知られている [4]. 筆者らはこの特性を利用した金属円盤型テラヘルツ表面波分割器を提案し [5], FDTD 法や陰的 FDTD 法を用いて動作特性を評価してきた [6]-[10].

本稿では、円筒座標系半陰的 FDTD 法を用いて金属円盤型表面波分割器を解析する。はじめに、マイクロ波帯で動作する表面波分割器を設計する。次に、半陰的 FDTD 法を用いて表面波分割器を解析する。半陰的 FDTD 法で得られる結果と陽的 FDTD 法による結果がほぼ完全に一致することを示す。さらに、設計に基づき分割器を作製する。解析から得られた放射パターンと実験値は良く一致し、円筒座標系半陰的 FDTD 法の有効性を明らかにする。最後に、計算精度を維持しな

がら計算時間は陽的 FDTD 法に比べて 20% 未満に短縮され、計算の効率化が図れることを明示する [11].

## 2. 本論

### (1) 設計

表面波分割器を設計するために、グレーティングの周期  $p$ 、凹部の幅  $d$ 、深さ  $h$  からなる 1 次元の金属グレーティング構造の分散特性を調査する。なお、マイクロ波帯では金属は完全導体 (PEC) として扱うことができる。分散関係式は以下の式で表される [4].

$$k = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{d^2}{p^2} \tan^2 \left( \frac{\omega}{c} h \right) + 1} \quad (1)$$

ここで、 $c$  は光速、 $\omega$  は角周波数である。式 (1) より、構造パラメータを適切に選択すれば、所望の周波数の電磁波をグレーティングに沿って伝搬させることができる。

図 1 に  $d = 2 \text{ mm}$ ,  $p = 5 \text{ mm}$ ,  $h = 4 \text{ mm}$  あるいは  $6 \text{ mm}$  とした際の分散曲線を示す。図より、12.5 GHz の表面波は  $h = 4 \text{ mm}$  のグレーティングに、9.5 GHz の表面波は  $h = 6 \text{ mm}$  のグレーティングに結合することが期待できる。しかしながら、9.5 GHz の表面波は、分散関係を満たすため  $h = 4 \text{ mm}$  のグレーティングにも結合する可能性のあることに留意する必要がある。

次に、図 1 の関係を満たすように設計した金属円盤

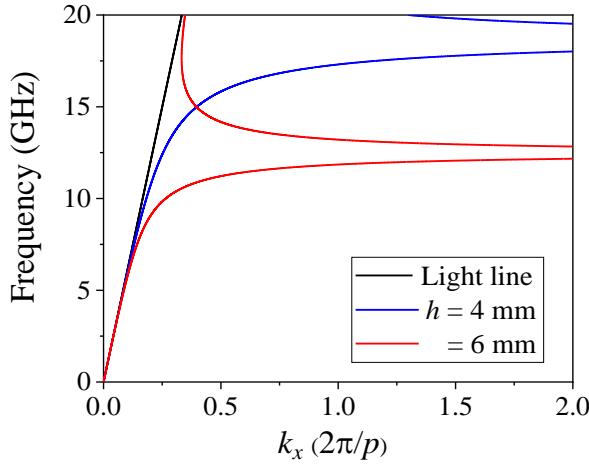


図 1 分散曲線

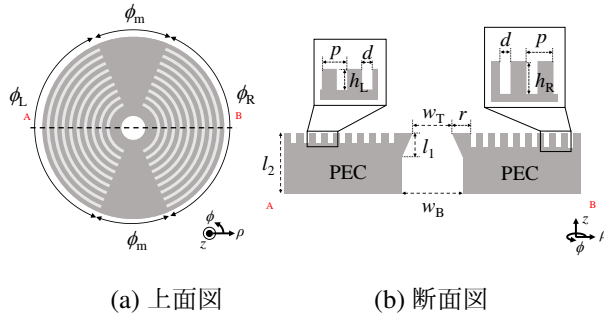
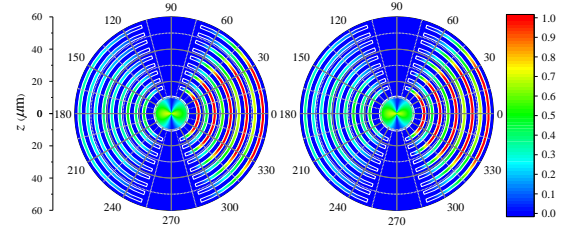


図 2 構造

型表面波分割器の構造を図 2 に示す。グレーティング周期数を 9 とし、周波数 12.5 GHz 及び 9.5 GHz を分割するために左右のグレーティングの深さをそれぞれ  $h_L = 4 \text{ mm}$ ,  $h_R = 6 \text{ mm}$  に選ぶ。グレーティングの開き角を  $\phi_L = \phi_R = 135^\circ$ , 金属部の開き角を  $\phi_m = 45^\circ$ , その他のパラメータを  $w_B = 25 \text{ mm}$ ,  $w_T = 16 \text{ mm}$ ,  $l_1 = 10 \text{ mm}$ ,  $l_2 = 25 \text{ mm}$ ,  $r = 8 \text{ mm}$ ,  $p = 5 \text{ mm}$ ,  $d = 2 \text{ mm}$  とする。解析では、空間刻み幅を  $\Delta\rho = \Delta z = 0.2 \text{ mm}$ ,  $\Delta\phi = 7.5^\circ$  に選ぶ。本構造は解析モデルが回転非対称のため、円筒座標系半陰的 FDTD 法の CFL 条件は以下の式で表される [2].

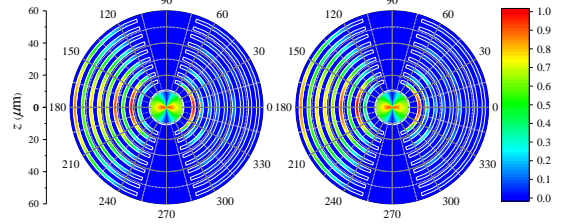
$$\Delta t_{\text{hie}} \leq \frac{n_{\min}}{c \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta\rho}\right)^2 + \left(\frac{1}{\rho_{\max} \Delta\phi}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta z}\right)^2}} \quad (2)$$

ここで、 $n_{\min}$  は計算領域内における最小の屈折率、 $\rho_{\max}$  は計算領域端の最外周の  $\rho$  座標である。半陰的 FDTD 法と陽的 FDTD 法の時間刻み幅の比を  $\text{CFLN} = \Delta t_{\text{hie}} / \Delta t_{\text{exp}}$  と定義する。金属は PEC として扱う。陰解法を用いて PEC を解析する場合、PEC 表面の電界を挟む 2 つの磁界成分が等しくなる条件を与えることで、電界の接線成分を 0 としている [12]。なお、吸収



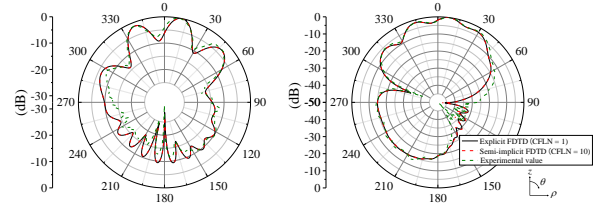
(a) 陽的 FDTD 法 (b) 半陰的 FDTD 法

図 3 界分布 ( $f = 9.5 \text{ GHz}$ )



(a) 陽的 FDTD 法 (b) 半陰的 FDTD 法

図 4 界分布 ( $f = 12.5 \text{ GHz}$ )



(a)  $f = 9.5 \text{ GHz}$  (b)  $f = 12.5 \text{ GHz}$

図 5 放射パターン

境界条件として Complex frequency shifted パラメータを導入した Convolutional perfectly matched layer を円筒座標系に導入する [13].

## (2) 解析及び実験結果

はじめに、陽的 FDTD 法及び半陰的 FDTD 法を用いて表面波分割器を解析する。半陰的 FDTD 法では、CFLN を 10 とする。図 3, 4 にそれぞれ 9.5, 12.5 GHz での円盤表面上における  $H_\phi$  成分の界分布を示す。半陰的 FDTD 法から得られた界分布は、両周波数で陽的 FDTD 法から得られた界分布とよく一致することがわかる。図 1 の分散曲線から考察したように、9.5 GHz の表面波は右側のグレーティングに強く結合しているが、左側のグレーティングにも結合している。他方、12.5 GHz の表面波は、主に左側のグレーティングのみに強く結合している。

次に、図 5 に両周波数における  $\rho$ - $z$  面の放射パターンを示す。CFLN を 10 に選んでも、半陰的 FDTD 法の結果は陽的 FDTD 法の結果とほぼ完全に一致していることがわかる。9.5 GHz では放射は  $\theta = 90^\circ$  及び  $270^\circ$  方向で観測される。これは、図 1 の分散曲線で予測さ

表 1 計算時間

	CFLN	CPU time (s)	Ratio
Explicit	1	37630	1
Semi-implicit	1	68270	1.81
	5	13718	0.36
	10	6949	0.18

れた結果と矛盾しない。他方、12.5 GHz では  $\theta = 90^\circ$  方向に放射は見られず、 $\theta = 270^\circ$  方向に放射が観測される。図 5 には実験結果も併記している。図より、実験結果と解析結果が良く一致していることがわかる。このことから、円筒座標系半陰的 FDTD 法による解析結果の妥当性が示される。

最後に、表 1 に各手法の計算時間を示す。計算には Core(TM) i7-4790 プロセッサ (3.60 GHz) を搭載した PC を使用している。半陰的 FDTD 法の計算時間は、CFLN = 1 で陽的 FDTD 法の 1.81 倍となっている。これに対して、CFLN = 10 では 18% まで計算時間の短縮が可能であり、半陰的 FDTD 法の有効性が確認できる。

### 3. まとめ

円筒座標系半陰的 FDTD 法を用いて金属円盤型表面波分割器を解析した。はじめに、マイクロ波帯で動作する表面波分割器を設計した。次に、半陰的 FDTD 法を用いて表面波分割器を解析した。CFLN を 10 に選んでも、半陰的 FDTD 法の解析結果と陽的 FDTD 法の結果がほぼ完全に一致することを示した。加えて、実験結果と解析結果が良く一致することを示し、半陰的 FDTD 法の妥当性を明示した。最後に、半陰的 FDTD 法の計算時間は CFLN = 10 で陽的 FDTD 法の 18% に短縮可能であることを明らかにした。

### 参考文献

- 1) N. Dib, T. Weller, M. Scardelletti, and M. Imparato, "Analysis of cylindrical transmission lines with the finite-difference time-domain method," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 47, no. 4, pp. 509-512, Apr. 1999.
- 2) J. Chen, J. Wang, and C. Tian, "Three-dimensional hybrid implicit-explicit finite-difference time-domain method in the cylindrical coordinate system," *IET Microw. Antennas Propag.*, vol. 3, no. 8, pp. 1254-1261, 2009.

- 3) 伊藤, 柴山, 山内, 中野, "円筒座標系半陰的 FDTD 法の開発と周波数依存型への拡張," 信学技報, vol. 117, no. 408, EST2017-91, pp. 93-97, 2018.
- 4) J. B. Pendry, L. Martin-Moreno, and F. J. Garcia-Vidal, "Mimicking surface plasmons with structured surfaces," *Science*, vol. 305, no. 5685, pp. 847-848, 2004.
- 5) J. Shibayama, J. Yamauchi, and H. Nakano, "Metal disc-type splitter with radially placed gratings for terahertz surface waves," *Electron. Lett.*, vol. 51, no. 4, pp. 352-353, 2015.
- 6) 柴山, 原, 伊藤, 山内, 中野, "プラズモニックデバイス解析のための円筒座標系 LOD-FDTD 法," 信学技報, vol. 117, no. 141, OPE2017-21, pp. 55-60, 2017.
- 7) J. Shibayama, T. Hara, M. Ito, J. Yamauchi, and H. Nakano, "A cylindrical LOD-FDTD method for the analysis of plasmonic devices," in *Proc. Progress in Electromagnetics Research Symposium*, Singapore, p. 800, 2017.
- 8) 柴山, 原, 山内, 中野, "Drude-Lorentz モデル解析のための周波数依存型円筒座標系 FLOD-FDTD 法," 信学ソ大, C-1-6, 2017.
- 9) J. Shibayama, T. Hara, M. Ito, J. Yamauchi, and H. Nakano, "Frequency-dependent LOD-FDTD method in cylindrical coordinates," *IEICE Trans. Electron.*, Vol.E101-C, No.8, pp. 637-639, 2018.
- 10) J. Shibayama, M. Ito, J. Yamauchi, and H. Nakano, "A fundamental LOD-FDTD method in cylindrical coordinates," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol 29, no 11, pp. 865-868, 2017.
- 11) 原, 柴山, 山内, 中野, "円筒座標系半陰的 FDTD 法を用いた金属円盤型表面波分割器の設計と作製," 信学技報, vol. 118, no. 209, EST2018-52, pp. 53-57, 2018.
- 12) W. C. Tay and E. L. Tan, "Implementations of PMC and PEC boundary conditions for efficient fundamental ADI- and LOD-FDTD," *J. Electromagn. Waves Appl.*, vol. 24, pp. 565-573, 2010.
- 13) 原, 柴山, 山内, 中野, "CFS-CPML の円筒座標系半陰的 FDTD 法への適用," 信学ソ大, C-1-13, 2018.